

特集：下水道における地球温暖化対策

# 下水処理施設における一酸化二窒素ガス発生量の削減

宮本綾子\* 小越眞佐司\*\*

## 1. はじめに

### 1.1 下水処理施設における一酸化二窒素ガス

下水道事業は自治体の温室効果ガス排出に占める割合が大きく、その削減のために積極的な対策をとることが求められている。一方で、下水道に関連する温室効果ガス排出原単位等の基礎情報は十分に整備されているとはいいがたい状況にある。特に、高度処理の推進に伴う生物学的窒素除去プロセスからの一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)等の温室効果ガス発生量増加の可能性が指摘されている<sup>1)</sup>。

下水処理場から発生する温室効果ガスの約50%はポンプ、ブロワ等の電力に由来するCO<sub>2</sub>である。また、汚泥の埋立、水処理から発生するCH<sub>4</sub>は全体の20%となっている。CO<sub>2</sub>の310倍の温室効果を持つとされるN<sub>2</sub>Oは、水処理及び汚泥焼却処理過程から発生し、その量はそれぞれ下水処理場から排出される温室効果ガスの8.7%、19.2%を占めると試算されている<sup>2)</sup> (図-1)。これまでの調査により、汚泥焼却による排出量は汚泥の種類や焼却方法による差異が大きいが、850℃以上での高温焼却が発生量削減に有効であるとされている<sup>3)</sup>。

### 1.2 水処理におけるN<sub>2</sub>Oの発生メカニズムとこれまでの知見

水処理では以下の2つの過程においてN<sub>2</sub>Oが生成することがわかっている (図-2)。

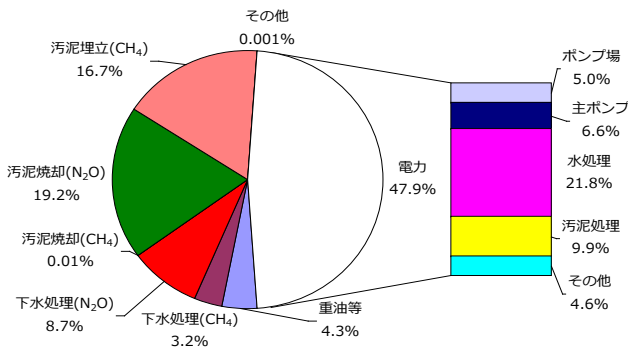


図-1 下水処理場から発生する温室効果ガス<sup>2)</sup>

### (1) 硝化反応

好気槽に流入したアンモニア性窒素はアンモニア酸化細菌によって亜硝酸性窒素に酸化された後、亜硝酸酸化細菌により硝酸性窒素に酸化される。N<sub>2</sub>Oはこの反応が不十分である場合に発生するとされる。このN<sub>2</sub>Oと後述の脱窒反応から発生したN<sub>2</sub>Oの一部は、曝気により大気中へ放出され、他は処理水中に残存したまま処理場外へ放流される。

### (2) 脱窒反応

無酸素槽では脱窒素細菌により硝酸性窒素および亜硝酸性窒素が還元される際にN<sub>2</sub>Oが発生する。

これまでの報告によれば、SRT\*が短い場合に脱窒反応時のN<sub>2</sub>O発生量が増大するとされているが、SRTが10日以上確保されていればN<sub>2</sub>O発生に大きな影響はなく<sup>4)</sup>、完全硝化状態から非完全硝化状態あるいはその逆へ移行している時期にN<sub>2</sub>O排出量が増加することがわかっている<sup>1)</sup>。

### 1.3 本調査の目的

当研究室では、水処理過程におけるN<sub>2</sub>O発生量の実態を把握し、より正確な発生量原単位をポスト京都議定書に反映させるための調査を実施している。平成19年度以降は実処理場においてN<sub>2</sub>O発生量の24時間調査を実施し、各種の水処理法からの発生量データを収集するとともに、N<sub>2</sub>O発生量に影響を与える要因について検討することを目的とした。

## 2. N<sub>2</sub>O発生量現地調査

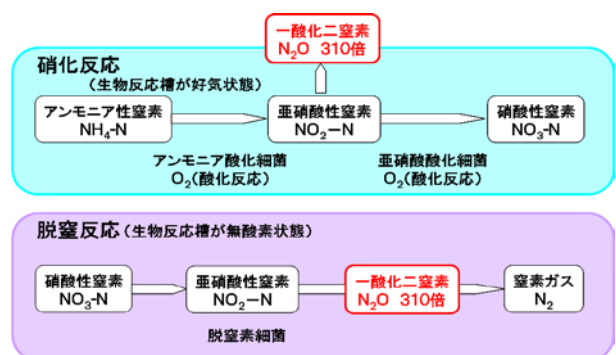


図-2 一酸化二窒素発生メカニズム

N<sub>2</sub>O Emission from Wastewater Treatment Process  
\*土木用語解説：SRT

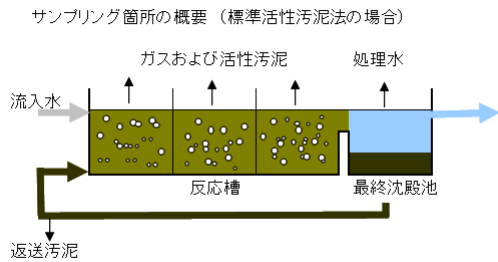


図-3 ガス試料の採取状況と採取箇所

## 2.1 調査方法

エアレーションに伴う反応槽からの排出 $N_2O$ と活性汚泥中の溶存 $N_2O$ を把握するための調査を、平成18年度から各地の下水処理場で行った。調査は、スポットサンプリングでは日内の変動を把握できず正確な排出量を24時間調査とした。反応槽からの発生ガスは、ロートをエアレーションタンクの水面付近に固定し、ロート内の空気を吸引した後にテドラバッグに1Lずつ採取し、採取箇所は原則として好気槽の入り口、中間、出口とした(図-3)。嫌気槽のある処理場では、そこから

の発生ガスも1箇所採取した。また、硝化状態をみるため、流入水、反応槽中の活性汚泥、処理水を採取し、液相 $N_2O$ 濃度、 $NH_4-N$ 、 $NO_3-N$ 、 $NO_2-N$ の測定を行った。ガス試料は、ECD付きガスクロマトグラフ (SHIMADZU ガスクロマトグラフ GC-8A) で $N_2O$ 濃度を測定した。液体試料中の $N_2O$ 濃度は、ヘッドスペース法 (温度 $40^{\circ}C$ 、恒温時間150min) により、ECD付きガスクロマトグラフで測定を行った。なお、試料採取から測定までにバイアル内の $N_2O$ 濃度が変化することを防止するため、液体試料には20%グルコン酸クロルヘキシジン溶液を添加し、試料中の微生物の活性を低下させた。

## 2.2 現地調査の結果

調査の結果を表-1に示す。なお、下段は平成17年度に実施したスポットサンプリングの結果であり、各調査日に1回だけサンプリングを行ったものであるが、ガス採取箇所、採取方法は24時間調査と同様である。全てのデータについての流入水量あたり排出量原単位を単純平均すると $73.9mg-N_2O-N/m_3$ となり、現状で下水の処理に伴う $N_2O$ の排出量原単位とされている $160mg-N_2O-N/m_3$ を下回る結果となった。

### 2.2.1 $N_2O$ 発生量とA-SRT

前述のように、 $N_2O$ 発生量とA-SRT\* (SRTのうち好気性条件での滞留時間) には相関があるとされている。これまで当研究室で実施した調査の結果を、縦軸にエアレーションにより排出される $N_2O$ 量と反応槽末の液相に残存する $N_2O$ 量の和、横軸にA-SRTをとって整理したものが図-4である。

表-1 現地調査結果まとめ

処理場名	N2O量 mgN2O-N/m3水量	SRT d	A-SRT d	処理水水質		処理法	サンプリング形式
				NH4-N mg/L	NO2-N mg/L		
A (11月)	38.5	7.7	7.7	0.20	12.5	標準活性汚泥法	24時間調査
A (3月)	91.5	6.4	6.4	0.18	14.1	標準活性汚泥法	
A (6月)	14.3	7.7	7.7	0.09	9.5	標準活性汚泥法	
B	3.1	21	15	0.01	6.8	循環式消化脱窒法	
B	3.8	21	15	0.01	7.1	循環式消化脱窒法	
C	8.4	11.6	7.5	0.30	7.5	嫌気好気活性汚泥法	
C	3.9	10	7.3	0.01	7.1	嫌気好気活性汚泥法	
C	12.2	22.8	13.5	0.04	6.1	循環式消化脱窒法	
D	50.9	8.00	6.00	ND	ND	擬似嫌気好気法	
E	2.0	8.89	5.38	ND	ND	ステップ流入式二段嫌気好気法	
F	1.1	3.70	3.70	25	0.04	標準活性汚泥法	
G	4.2	5.70	4.28	18.22	0.05	擬似嫌気好気法	
H 1系	305.7	5.20	3.47	3.15	1.08	嫌気好気法	
H 2系	511.2	3.70	3.70	0.61	0.14	擬似嫌気好気法	
I 1系	6.5	7.90	5.93	3.75	0.13	嫌気好気法	
I 2系	62.9	5.60	4.20	2.19	0.16	擬似嫌気好気法	
J 1系	40.0	8.90	7.28	0.16	0.11	擬似嫌気好気法	
J 2系	170.9	9.90	8.10	0.47	0.15	擬似嫌気好気法	

\*土木用語解説：A-SRT、ECD付きガスクロマトグラフ

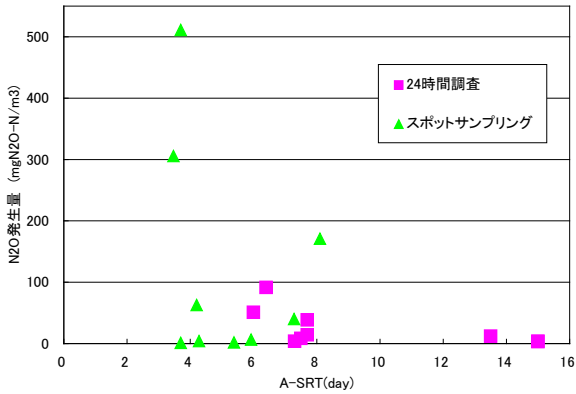


図-4 A-SRTとN<sub>2</sub>O発生量の関係

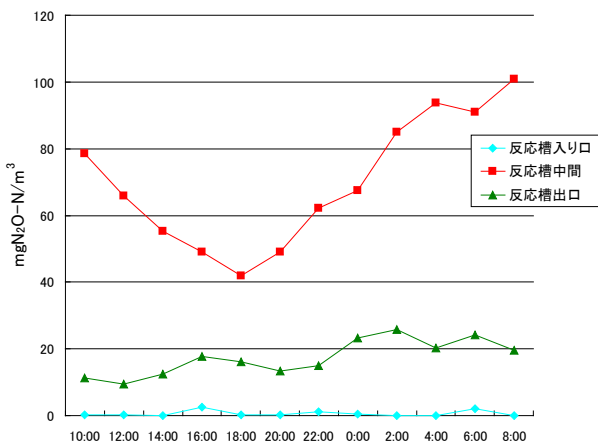


図-5 反応槽各位置のN<sub>2</sub>O発生量経時変化

A-SRTがおよそ6日未満の場合に排出N<sub>2</sub>Oが高くなるケースがみられた。図中のA-SRTが4.2日および4.28日のケースでは低A-SRTにおいても排出量が低くなっている。これらのケースでは処理水中のNH<sub>4</sub>-N濃度が約20mg/Lと高い値を示しており、反応槽で硝化反応が進まなかったことから中間生成物であるN<sub>2</sub>Oが発生しなかったものと考えられる。

### 2.2.2 N<sub>2</sub>O発生量の変動

24時間調査を行った処理場でN<sub>2</sub>O発生量の経時変化をみたところ、1日のうちに大きな変動があることがわかった。一例として、発生量の大きい日があったA処理場の、反応槽3箇所から気中に放出されたN<sub>2</sub>O量の経時変化を図-5に示す。発生量の合計値は18時に最低値の61.2mg-N<sub>2</sub>O-N/m<sup>3</sup>、8時に最高値の124.6mg-N<sub>2</sub>O-N/m<sup>3</sup>となり、1日のうちで2倍の差があった。また、ピークを示す時間は、同じ処理場であってもそれぞれの調

表-2 水質分析結果

流入水	水質(mg/L)						
	T-N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	T-P	PO <sub>4</sub> -P	
3月	31.9	21.3	0.1	0.0	3.6	1.6	
6月	28.9	18.3	0.0	0.0	3.4	1.6	
11月	31.7	20.0	0.0	0.0	3.5	1.6	
反応槽中間							
	3月	123.8	3.1	2.0	4.6	38.1	2.6
	6月	115.1	8.7	0.2	1.7	41.4	1.9
11月	96.7	8.4	0.3	2.4	30.8	3.9	
処理水							
	3月	15.3	0.2	0.2	14.1	1.1	1.0
	6月	12.9	0.1	0.1	9.5	1.0	0.9
11月	14.5	0.2	0.3	12.2	1.2	1.0	

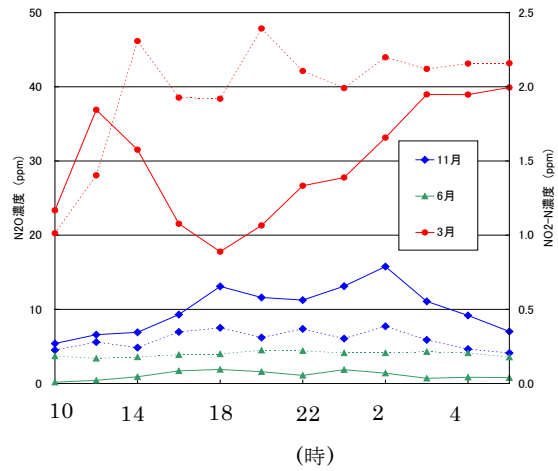


図-6 反応槽中間のNO<sub>2</sub>-N濃度とガス中N<sub>2</sub>O濃度  
(実線：N<sub>2</sub>O濃度、破線：NO<sub>2</sub>-N濃度)

査について異なっており、流入水の水質変動等による影響があると考えられる。このことから、特にN<sub>2</sub>O発生量の多い処理場では24時間調査を行ったうえで排出量を算定することが望ましいと考えられる。

### 2.2.3 N<sub>2</sub>O発生量と亜硝酸性窒素

N<sub>2</sub>O発生量は反応槽での硝化状態に関係することがわかっている<sup>5)</sup>。

前節のA処理場の反応槽中間で採取したガスのN<sub>2</sub>O濃度と、そこで採取した活性汚泥中のNO<sub>2</sub>-N濃度の変化を図-6に示す。A処理場ではこれまでに3月、6月、11月の3回調査を実施したが、活性汚泥中NO<sub>2</sub>-N濃度の高いケースほどガス中N<sub>2</sub>O濃度が高い傾向がみられた。表-2はこれらの3回の調査の際の水質分析結果である。流入水と処理水の水質は3回ともほぼ同程度であったが、3月の調査では反応槽の中間で活性汚泥中NO<sub>2</sub>-N濃度が高く、6月と11月は反応槽と処理水でほぼ同

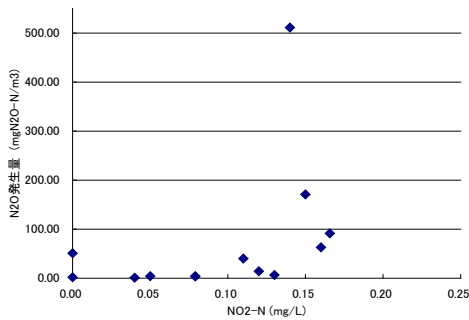


図-7 処理水中の亜硝酸性窒素濃度とN<sub>2</sub>O発生量

程度の濃度であった。6月と11月の調査では、反応槽中間と反応槽出口付近のガス中N<sub>2</sub>O濃度がほぼ同程度の低い値を示し、3月の調査では反応槽の中間で特にN<sub>2</sub>O濃度が高かったものの反応槽出口付近での濃度は他の月とほぼ同程度であった。なお、このときN<sub>2</sub>Oガスは総量の約80%が反応槽の中間で発生していた。このことから、3月の調査時は6月および11月と硝化状態が異なり反応槽の前半～中間で亜硝酸の酸化が十分進まなかったためN<sub>2</sub>Oが大量に発生したと推定される。

これまで実施した調査について、処理水中のNO<sub>2</sub>-N濃度と反応槽からのN<sub>2</sub>O発生量の関連を図-7にまとめて示す。実施した調査では処理水中のNO<sub>2</sub>-N濃度分布が既往の調査<sup>5)</sup>に比べて低い範囲にあるものの、NO<sub>2</sub>-N濃度が高いほどN<sub>2</sub>O発生量が多くなる傾向がみられた。しかし、その傾向に当てはまらないデータもあることから、今後は各ケースの流入水質、温度、反応速度等、NO<sub>2</sub>-N濃度以外の要素がN<sub>2</sub>O発生量に与える影響について検討を行う予定である。

### 3. まとめ

水処理過程におけるN<sub>2</sub>O発生量の実態を把握するため、実処理場において発生量調査を実施したところ、これまでに以下のような結果が得られた。

(1) N<sub>2</sub>O発生量について調査を行ったところ、発生量は現状の排出量原単位を下回っていたが、N<sub>2</sub>O発生量は経時変化が大きく、また同一の処理場でも変動がある。

(2) 処理水に亜硝酸性窒素が残っている、またはA-SRTの短いケースでN<sub>2</sub>O発生量の大きくなる傾向があった。標準活性汚泥法の処理場で複数回実施した調査の結果から、硝化が十分に進まず亜硝酸性窒素が反応槽内に蓄積しているような状況

でN<sub>2</sub>Oの気層への放出量が増加した。硝化過程からの排出量削減のためには硝化が途中で止まることのないように適切に処理されることが望ましい。ただし、例えば曝気動力を増加させた場合、電力消費によるCO<sub>2</sub>が増加し、処理全体からの温室効果ガス発生量が増加する可能性があることから全体のバランスを検討する必要がある。

(3) 正確な排出量原単位を求めるため、また、排出量削減につながる運転管理手法を提案するため、今後もデータを集積し、排出量に影響を与える要因について検討していく。

### 謝 辞

調査にご協力いただいた各自治体に感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 平出亮輔、中島智史、中島英一郎、鈴木善三、川嶋幸徳：下水道施設から排出される地球温暖化物質（CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O）排出インベントリーの算定と排出抑制技術、下水道協会誌、No.508、Vol.42、(社)日本下水道協会、pp.97～110、2005
- 2) 下水道における地球温暖化防止実行計画策定の手引き、国土交通省、平成21年3月  
<http://www.mlit.go.jp/common/000036176.pdf>
- 3) 平出亮輔：下水道の環境保全技術～汚泥焼却炉の温室効果ガス対策～、土木技術資料、(財)土木研究センター、第49巻、第2号、pp.19～20、2007
- 4) 水落元之、稲石高雄、市川雅英、大石亮、木持謙、稲森悠平：生物学的嫌気好気活性汚泥法におけるN<sub>2</sub>O発生に及ぼすSRT、DOの影響、水環境学会誌、No.22、Vol.22、pp.145～151、1999
- 5) 東京都下水道局：東京都下水道局技術調査年2002、<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/gn14/nenpou2002/REPORT64.pdf>

宮本綾子\*



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道処理研究室 研究官  
Ayako MIYAMOTO

小越眞佐司\*\*



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道処理研究室長  
Masashi OGOSHI